

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND

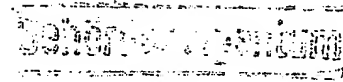


DEUTSCHES  
PATENTAMT

①2 Offenlegungsschrift  
①1 DE 38 11 051 A 1

⑤1 Int. Cl. 4:  
H01 B 12/02  
C 04 B 35/00  
C 04 B 35/50

②1 Aktenzeichen: P 38 11 051.2  
②2 Anmeldetag: 31. 3. 88  
④3 Offenlegungstag: 12. 10. 89



DE 3811051 A1

⑦1 Anmelder:

Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:

Bogner, Günther, Dr., 8520 Erlangen, DE; Krupski, Jürgen, Dr., 1000 Berlin, DE; Schnapper, Christoph, Dr., 8520 Erlangen, DE

⑤4 Supraleitendes Kabel mit oxidkeramischem Hochtemperatursupraleiter-Material

Das supraleitende Kabel enthält ein starres Innenrohr, in dem mindestens eine supraleitende Leiterader mit einem oxidkeramischem Hochtemperatursupraleiter-Material angeordnet ist, welche von einem entsprechenden Kühlmedium gekühlt wird. Das Innenrohr ist von einem starren Außenrohr konzentrisch umschlossen, wobei zwischen Innen- und Außenrohr ein evakuierter Zwischenraum ausgebildet ist. Bei diesem Kabel sollen kühltechnische Probleme aufgrund von Wirbelströmen in metallischen Rohrteilen vermieden werden, wobei ein einfacher Aufbau angestrebt wird. Hierzu ist vorgesehen, daß die mindestens eine Leiterader (7a bis 7c) einen Stützkörper (8) aufweist, um den schraubenförmig ein bandförmiger Leiter (12) mit einem Hochtemperatursupraleiter-Material (Wickel 10) gewickelt ist, wobei dieses Material zu seiner Stabilisierung zumindest stellenweise mit elektrisch gutleitendem Material kontaktiert ist, und daß zumindest das das Kühlmedium (LN<sub>2</sub>) führende Innenrohr (22) aus einem vakuum- und kühlmitteldichten Kunststoffmaterial besteht. Vorteilhaft wird auch das Außenrohr (23) aus diesem Material hergestellt.

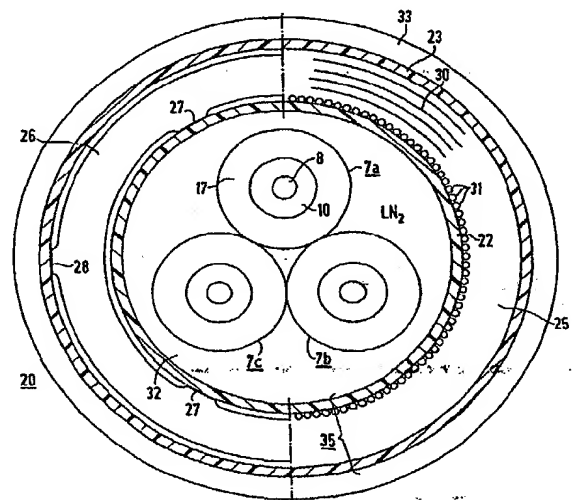


FIG 4

DE 3811051 A1

Die Erfindung bezieht sich auf ein supraleitendes Kabel mit einem starren Innenrohr, in dem mindestens eine supraleitende Leiterader mit einem oxidkeramischen Hochtemperatursupraleiter-Material angeordnet ist, das von einem entsprechenden Kühlmittel gekühlt ist, und das von einem starren Außenrohr konzentrisch umschlossen ist, wobei zwischen dem Innen- und dem Außenrohr ein evakuierter Zwischenraum ausgebildet ist. Ein derartiges Kabel ist z.B. in der Veröffentlichung von A.P.Malozemoff et al: "Applications of High Temperature Superconductivity", IBM T.J.Watson Research Center and Massachusetts Institute of Technology, August 1987, angedeutet.

Zu einer Drehstromübertragung insbesondere auf der gebräuchlichen Spannungsebene von 110 kV werden Kabel gefordert, die für sehr große Leistungen von beispielsweise 1 GVA bei hohen Strömen von z.B. 5 kA ausgelegt sind und bei geringem Platzbedarf günstige Übertragungskosten ermöglichen. Entsprechend große Leistungen werden bisher nur mit künstlich gekühlten Ölkabeln oder mit SF<sub>6</sub>-Kabeln übertragen.

Entwickelt, jedoch aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht eingesetzt, wurden auch supraleitende Hochleistungskabel mit Flüssighelium-Kühlung und Hochvakuumisolation (vgl. z.B. Beitrag von G.Bogner in "Nato Advanced Study Institutes Series", Series B: Physics, Vol. 21: "Superconductor Applications", Plenum Press, New York 1977, Chapter 20, Abschnitt V: "Superconducting Cables", Seiten 672 - 717). Entsprechende Kabel weisen jeweils ein starres Innenrohr auf, in dem mindestens eine supraleitende Leiterader angeordnet ist. Diese Leiterader muß immer von flüssigem Helium (LHe) gekühlt werden, das dieses Innenrohr durchströmt. Das Innenrohr wird deshalb vielfach auch als Helium(He)-Rohr bezeichnet. Dieses Rohr ist von einem vakuumdichten Außenrohr umschlossen, das im allgemeinen aus Stahl besteht. Zur thermischen Isolation ist der zwischen dem Innen- und dem Außenrohr befindliche Zwischenraum evakuiert. Außerdem ist in dem evakuierten Zwischenraum zur Reduzierung der Wärmeleitung auf das He-kalte Innenrohr im allgemeinen ein gekühlter thermischer Strahlungsschild untergebracht.

Auch das He-Rohr eines solchen supraleitenden Kabels muß aus Metall, insbesondere aus Stahl hergestellt werden, weil die äußerst kleinen Heliumatome andere Materialien leicht durchdringen würden und dann die Hochvakuumisolation beeinträchtigen könnten. In metallischen Kühlmittelrohren werden aber Wirbelströme induziert, die erhebliche Wärme produzieren. Die damit verbundenen Zusatzverluste müssen vom Kühlmedium bei sehr ungünstigem Wirkungsgrad der entsprechenden Kältemaschine abgeführt werden. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wurden in bekannten supraleitenden Drehstromkabeln stets koaxiale, abgeschirmte Leiteradern verwendet. Ein derartiger koaxialer Aufbau bedingt jedoch mindestens doppelt so viel Supraleitermaterial, wie es für einen einfachen Leiteraufbau erforderlich wäre. Außerdem ist für entsprechende Kabel eine entsprechend angepaßte, unübliche Beschaltungstechnik erforderlich.

Seit etwa Anfang 1987 sind supraleitende Materialien bekannt, deren Sprungtemperatur  $T_c$  so hoch ist, daß sie nicht mehr mit flüssigem Helium (LHe) von etwa 4 K zu kühlen sind, sondern bei denen eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff (LN<sub>2</sub>) genügt. Bei diesen Materialien

handelt es sich um spezielle Metalloxide wie z.B. auf Basis des Stoffsystems Y-Ba-Cu-O (vgl. z.B. "Europhysics Letters", Vol. 4, No. 2, 15.7.87, Seiten 247 bis 252 und Vol. 4 No. 5 19.87 Seite 637 oder "Physikalische Blätter" Bd. 43 Nr. 9 1987 Seiten 357 bis 363). Filme bzw. dünne Schichten aus diesen Metalloxydverbindungen werden vielfach mit speziellen Bedampfungs- oder Sputterprozessen hergestellt. Hierbei wird auf einem geeigneten Substrat zunächst ein polykristallines oder amorphes Vorprodukt mit den Komponenten des gewählten Stoffsystems abgeschieden, wobei im allgemeinen der Sauerstoffgehalt nicht exakt eingestellt ist. Dieses Vorprodukt wird anschließend mittels einer Wärme- und Sauerstoffbehandlung in das Material mit der gewünschten supraleitenden Phase überführt. Neben dem genannten Stoffsystem Y-Ba-Cu-O weisen auch andere Stoffsysteme so hohe Sprungtemperaturen auf, daß sie mit LN<sub>2</sub> auf ihrer supraleitenden Betriebstemperatur zu halten sind. So sind z.B. Materialien auf Basis des Stoffsystems Bi-Sr-Ca-Cu-O (vgl. "Superconducting News Supplement", Vol. 1, No. 3, Februar 1988) oder auf Basis des Stoffsystems Tl-Sr-Ca-Cu-O (vgl. z.B. "International Conference on High  $T_c$  Superconductors and Materials and Mechanisms of Superconductivity", 29.2.-4.3.1988, Interlaken, CH) oder auf Basis des Stoffsystems La-Sr-Nb-O (vgl. z.B. "The Japan Times" vom 21.1.1988 oder "Journal of Low Temperature Physics", Vol. 69, Nos. 5/6, 1987, Seiten 451 bis 457) bekanntgeworden.

Alle diese supraleitenden Materialien sind den Oxidkeramiken zuzurechnen, so daß die entsprechenden Hoch- $T_c$ -Supraleiter vielfach auch als oxidkeramische Supraleiter bezeichnet werden.

Mit dem eingangs genannten Beitrag von A.P.Malozemoff et al ist vorgeschlagen worden, derartige oxidkeramische Supraleiter auch für supraleitende Kabel ("Superconducting Power Transmission Lines-SPTL") vorzusehen. Dabei wird von bekannten Konzepten supraleitender Kabel mit von LHe zu kühlenden Supraleitern ausgegangen. Bei diesen Konzepten treten aber die erwähnten Probleme hinsichtlich Wirbelströmen, Aufwand an Supraleitermaterial und Beschaltungstechnik auf.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ausgehend von diesem Kabelkonzept ein supraleitendes Kabel anzugeben, dessen mindestens eine supraleitende Leiterader mit einem bekannten oxidkeramischen Hochtemperatursupraleiter-Material erstellt werden kann. Dieses Kabel soll einen möglichst einfachen Aufbau und eine an das Hochtemperatursupraleiter(HTSL)-Material angepaßte Kühltechnik ermöglichen, wobei insbesondere die bei den bekannten Kabeln durch Wirbelströme in metallischen Rohrteilen hervorgerufenen thermischen Zusatzverluste zumindest weitgehend ausgeschaltet sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die mindestens eine Leiterader einen Stützkörper aufweist, um den schraubenförmig ein bandförmiger Leiter mit dem Hochtemperatursupraleiter-Material gewickelt ist, wobei dieses Material zu seiner Stabilisierung zumindest stellenweise mit elektrisch gut leitendem Material kontaktiert ist, und daß zumindest das das Kühlmedium führende Innenrohr aus einem vakuum- und kühlmitteldichten Kunststoffmaterial besteht.

Die mit dieser Ausgestaltung des supraleitenden Kabels verbundenen Vorteile sind insbesondere darin zu sehen, daß sich mit dem bandförmigen HTSL-Material eine Leiterader verhältnismäßig einfach aufbauen läßt. Eine erforderliche Stabilisierung des HTSL-Materials

wird dabei durch eine Kontaktierung mit dem elektrisch gut-leitenden Material gewährleistet. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, daß der bandförmige Leiter selbst mit dem Stabilisierungsmaterial versehen ist. Ebenso ist es auch möglich, daß das HTSL-Material des bandförmigen Leiters an dem Stabilisierungsmaterial eines benachbarten Leiters anliegt. Bei dem benachbarten Leiter kann es sich dabei auch um einen nur aus dem Stabilisierungsmaterial bestehenden Leiter handeln.

Mit der Verwendung von einem Innenrohr aus einem elektrisch nicht-leitenden Material werden vorteilhaft Probleme aufgrund von in metallischen Teilen angefahten Wirbelströmen von vornherein ausgeschlossen. Hierfür geeignete Kunststoffmaterialien, die hinsichtlich  $\text{LN}_2$  kühlmitteldicht sind, sind allgemein bekannt.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des supraleitenden Kabels gehen aus den Unteransprüchen hervor.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird nachfolgend auf die schematische Zeichnung Bezug genommen. In Fig. 1 ist der prinzipielle Aufbau eines für ein erfindungsgemäßes Kabel geeigneten bandförmigen Hochtemperatursupraleiters angedeutet. Aus Fig. 2 geht ein Längsschnitt durch eine Leiterader des Kabels hervor, während Fig. 3 einen die Hochtemperatursupraleiter betreffenden Ausschnitt dieser Leiterader zeigt. In Fig. 4 ein Querschnitt durch ein supraleitendes Kabel veranschaulicht ist. Die Fig. 5 und 6 zeigen jeweils als Längsschnitt eine Verbindungsmöglichkeit von Teilstücken des Rohrsystems dieses Kabels. Dabei sind in den Figuren sich entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

Aus Fig. 1 ist in Schrägansicht der prinzipielle Aufbau eines Endstückes eines bandförmigen Supraleiters 2 ersichtlich, wie er für ein erfindungsgemäßes supraleitendes Kabel geeignet ist. Dieser Leiter enthält ein metallisches Trägerband 3. Das Trägerband kann insbesondere aus einem elektrisch gut-leitenden Material wie z.B. aus Cu oder Al bestehen und dient als Träger für eine dünne Schicht 4 aus einem bekannten supraleitenden Material mit hinreichend hoher Sprungtemperatur  $T_0$ , so daß als Kühlmedium flüssiger Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ) vorgesehen werden kann. Ein entsprechendes Hochtemperatursupraleiter (HTSL)-Material ist z.B.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (mit  $0 < x < 0,5$ ) mit orthorhombischer Kristallstruktur. Damit das HTSL-Material auf dem Trägerband 3 als gut haftende Schicht 4 ausgebildet werden kann, ist im allgemeinen eine dünne Zwischenschicht 6 erforderlich, die vorzugsweise aus einem bestimmten keramischen Material erstellt wird. So kann die Zwischenschicht 6 z.B. aus  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Y-stabilisiertem  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  oder  $\text{SrTiO}_3$  bestehen.

Mit entsprechend aufgebauten bandförmigen Supraleitern läßt sich nun eine Leiterader des erfindungsgemäßen Kabels erstellen. Ein entsprechendes Ausführungsbeispiel einer solchen Leiterader ist in Fig. 2 als Längsschnitt schematisch dargestellt. Von dieser Leiterader ist in Fig. 3 ein Ausschnitt einer Wickelanordnung ihrer HTSL-Bandleiter vergrößert wiedergegeben.

Die in Fig. 2 gezeigte Leiterader 7 enthält einen zentralen Stützkörper 8, der vorteilhaft aus einem elektrisch gut-leitenden Metall wie z.B. aus Al oder Cu besteht und für das Kühlmedium  $\text{LN}_2$  hinreichend transparent ist. Gemäß dem angenommenen Ausführungsbeispiel ist der Stützkörper 8 als Seil ausgebildet, dessen zentrale Achse mit z bezeichnet ist. Um diesen gegebenenfalls mit einer Metallfolie 9 geglätteten Stützkörper sind nun mehrere HTSL-Bandleiter schraubenförmig in mehreren Lagen gewickelt. In der Figur sind aus Grün-

den der Übersichtlichkeit nur wenige Lagen dargestellt, obwohl im allgemeinen deren Anzahl wesentlich größer ist. Der Aufbau des Wickels 10 geht aus Fig. 3 näher hervor. Wie aus dieser Figur ersichtlich, sind die bandförmigen Supraleiter 12 unter Zugrundelegung des in Fig. 1 gezeigten Aufbaus so stufenförmig strukturiert, daß sie im Wickel 10 in zwei Ebenen zu liegen kommen, wobei sich benachbarte Bandleiter jeweils etwa zur Hälfte überlappen. Innerhalb des Wickels hat jeweils das Metall des Trägerbandes 12a des darüber gewickelten Leiters elektrischen Kontakt zur HTSL-Schicht 12b des darunter befindlichen Leiters. Auf diese Weise ist eine gute Stabilisierung des HTSL-Materials der Schichten 12b zu gewährleisten, d.h., für den als "Quench" bezeichneten Fall, in dem das supraleitende Material in den elektrisch schlecht-leitenden Normalleitungszustand übergeht, kann der Strom in das Metall des darüberliegenden Leiters ausweichen. Da die z.B. aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{SrTiO}_3$  bestehende Zwischenschicht 12c zwischen dem Trägerband 12a und der HTSL-Schicht 12b jedes Leiters 12 selbst einen elektrischen Isolator darstellt, ist nämlich innerhalb eines Leiters 12 ein direkter Stromübertritt vom HTSL-Material in das metallische Trägermaterial praktisch nicht möglich.

Wie ferner aus Fig. 3 ersichtlich ist, können in den Wickel 10 zusätzlich zu den HTSL-Bandleitern 12 auch Leiterbänder 14 aus elektrisch gut-leitenden Metallen eingewickelt werden, die den Stromübertritt zwischen den verschiedenen Schichten innerhalb des Wickels fördern. Derartige Leiterbänder sind insbesondere dann erforderlich, wenn für die Trägerbänder 12a der HTSL-Bandleiter 12 Materialien gewählt werden, die für eine vollständige Stabilisierung des supraleitenden Materials innerhalb des Wickels 10 nicht ausreichen.

Gemäß Fig. 2 kann der Wickel 10 nach außen hin mittels einer Metallfolie 16 geglättet sein, bevor er mit einer elektrischen Isolation 17 ummantelt wird. Diese Isolation kann z.B. in Form einer Wicklung aufgebaut sein, wie sie bei papierisolierten Kabeln gebräuchlich ist. Sie wird vorteilhaft mit dem zur Kühlung des HTSL-Materials vorgesehenen Kühlmedium  $\text{LN}_2$  getränkt, ist also entsprechend transparent gestaltet. Dieses Kühlmedium hat nämlich hervorragende Isolationseigenschaften, solange sich die Bildung von Dampfblasen vermeiden läßt.

Auf die Isolation 17 ist ein Schirm 18 aufgebracht, der die Funktionen Potentialsteuerung und Begrenzung des elektrischen Feldes, Fortleitung von Ableit- und Ladeströmen und elektrischer Berührungsschutz erfüllt. Darüber befindet sich eine Hülle 9 als mechanische Gleithilfe zur Erleichterung des Einziehens der Leiterader 7 in ein Kühlrohr. Da dieses Kühlrohr bei dem erfindungsgemäßen supraleitenden Kabel aus elektrisch nicht-leitenden Materialien bestehen kann, benötigt die Leiterader 7 vorteilhaft keinen zweiten, konzentrischen Rückleiter, wie er bei bisher bekannten supraleitenden Kabeln als erforderlich angesehen wird.

Leiteradern mit dem in den Fig. 2 und 3 gezeigten Aufbau können vorteilhaft für das erfindungsgemäße supraleitende Kabel vorgesehen werden. Ein solches Kabel ist in Fig. 4 als Querschnitt schematisch veranschaulicht. Dieses mit 20 bezeichnete Kabel kann insbesondere als Drehstromkabel ausgelegt sein, so daß es drei Leiteradern 7a bis 7c enthält. Zur Aufnahme dieser Leiteradern weist das Kabel ein Innenrohr 22 auf, das vorteilhaft aus einem vakuum- und kühlmitteldichten Kunststoffmaterial besteht. Das Innenrohr ist konzentrisch von einem Außenrohr 23 umschlossen, wobei ein

im Querschnitt ringförmiger Zwischenraum 25 ausgebildet ist. Für das Außenrohr kann beispielsweise das Material des Innenrohres vorgesehen sein. Die beiden Rohre 22 und 23 können insbesondere aus einem faserverstärkten Kunststoff hergestellt werden. Hierfür sind z.B. spezielle Epoxidharze oder Thermoplaste geeignet, die insbesondere mit Glas-, Keflar- oder Kohlefasern verstärkt sind. Die beiden Rohre 22 und 23 sind mittels thermisch schlecht-leitender Stützstrukturen in ihrer konzentrischen Lage gehalten. In der Figur ist die Hälfte eines entsprechenden Stützringes 26 angedeutet. Dieser Stützring ist so ausgebildet, daß verhältnismäßig lange Wege zwischen seinen Abstützungspunkten 27 und 28 an dem Innenrohr 22 bzw. dem Außenrohr 23 ausgebildet sind. In dem aus thermischen Gründen evakuierten Zwischenraum 25 kann sich ferner zur Begrenzung der Wärmeeinleitung auf das Innenrohr 22 eine bekannte mehrschichtige Superisolation 30 befinden die in der Figur nur für eine Hälfte des Kabels angedeutet ist. Außerdem kann auf der Vakuumseite des Innenrohres 22 ein Adsorptionsmittel 31, z.B. Aktivkohle oder ein Zeolith, aufgebracht sein. Mit diesem Adsorptionsmittel lassen sich im kalten Zustand des Kabels die restlichen Moleküle im Vakuumraum binden.

Die in dem Innenraum 32 des Innenrohres 22 untergebrachten Leiteradern 7a bis 7c werden von einem durch den Innenraum strömenden Kühlmedium, vorzugsweise von flüssigem Stickstoff LN<sub>2</sub> umspült. Das Innenrohr 22 wird deshalb vielfach auch als Kühlrohr bezeichnet. Das Kühlmedium befindet sich z.B. in einem unterkühlten, flüssigen Zustand; d.h. im Normalbetrieb ist ein Sieden des Kühlmediums ausgeschlossen. Beispielsweise wird LN<sub>2</sub> mit einer Temperatur von ca. 70 K und einem Absolutdruck von ca. 5 bar in das Innenrohr 22 eingeleitet. Beim Strömen durch dieses Rohr wird das Kühlmedium erwärmt und der Druck nimmt ab. Am Ende des Rohres tritt das Kühlmedium immer noch unterkühlt aus, z.B. mit einer Temperatur von ca. 80 K und einem Absolutdruck von ca. 3 bar.

Wie schließlich in Fig. 4 noch angedeutet ist, kann das Außenrohr 23 des supraleitenden Kabels 20 von einer Schutzschicht 33, die z.B. aus Bitumen besteht, umhüllt sein. Auf diese Weise lassen sich mechanische Beschädigungen des Kabels und ein Eindringen von Wasser vermeiden.

Das die thermische Isolation der supraleitenden Leiteradern 7a bis 7c bzw. des sie umgebenden LN<sub>2</sub> gewährleistende Rohrsystem des supraleitenden Kabels 20 ist in Fig. 4 allgemein mit 35 bezeichnet. Dieses Rohrsystem wird vorteilhaft aus vorgefertigten Teilstücken mit Außen- und Innenrohr zusammengefügt. Ein Verbindungsbereich zwischen zwei derartigen, benachbarten Teilstücken geht aus Fig. 5 hervor. Dabei sind in dieser Figur nur die bzgl. der Kabelachse A oberen Hälften von Teilstücken 36 und 37 als Längsschnitt schematisch veranschaulicht. Wie aus dieser Figur ersichtlich, ist jedes der Teilstücke 36 und 37 so ausgeführt, daß der evakuierte Raum 25 zwischen dem Innenrohr 22a bzw. 22b und dem Außenrohr 23a bzw. 23b an den beiden Stirnseiten 38 bzw. 39 jedes Teilstückes vakuumdicht abgeschlossen ist. Bereits bei der Herstellung der Teilstücke wird dann deren Raum 25 an einem Evakuierungsstutzen 40 evakuiert, der anschließend vakuumfest verschlossen wird. Um die Vakuumdichtigkeit der einzelnen Kunststoffteile noch zu verbessern, können gegebenenfalls in dem Außen- und Innenrohr 23a, 23b bzw. 22a, 22b sowie in den Verbindungsteilen dieser Rohre an den Stirnseiten 38 und 39 dünne metallisierte

Folien 41 als Diffusionssperren eingearbeitet sein.

Die einander zugewandten Stirnseiten 38 und 39 der benachbarten Teilstücke 36 und 37 sind so gestaltet, daß jeweils das eine Ende des einen Teilstückes in das andere Ende des anderen Teilstückes konzentrisch hineinragt. Auf diese Weise läßt sich erreichen, daß Wärme, die vom warmen Außenrohr zum kalten Innenrohr fließen will, über die konzentrisch ineinanderragenden Rohrteile fließen und somit einen entsprechend langen Weg überwinden muß. Die Wärmeeinleitung in den LN<sub>2</sub>-Bereich im Innenraum 32 der Rohre 22a, 22b läßt sich dementsprechend begrenzen. Zwischen den ineinanderragenden Teilen der Teilstücke 36 und 37 ist ein schmaler Spalt 42 ausgebildet. In einem sich axial erstreckenden Teil dieses Spaltes 42 befindet sich ein Dichtungselement 43, das den mit LN<sub>2</sub> gefüllten Innenraum 32 von der Umgebung trennt. Zusätzlich kann der Spalt 42 nach außen hin noch mittels einer rohrförmigen Hülse 44 abgedeckt sein, die mit einem der beiden benachbarten Außenrohre 23a oder 23b verbunden, beispielsweise verklebt wird. Die Hülse 44 kann aber auch integrierter Bestandteil dieses Außenrohres sein.

Jedes der Teilstücke 36 und 37 besitzt außerdem noch eine Vorrichtung 45 zum Dehnungsausgleich, mit der Längenänderungen des Innenrohres 22a, 22b beim Abkühlen kompensiert werden. Diese Vorrichtung 45 ist bei der in Fig. 5 gezeigten Ausführungsform des Teilstückes 36 in dessen Außenrohr 23a in der Nähe der Stirnseite 38 integriert. Dies hat zur Folge, daß sich bei einer Abkühlung des Kabels das Außenrohr 23a um das Schrumpfungsmaß des Innenrohres 22a in axialer Richtung verkürzt. Der axiale Abstand a zwischen den Stirnseiten 38 und 39 der benachbarten Teilstücke 36 und 37 erweitert sich somit dementsprechend. Um zumindest weitgehend eine Konstanz der Länge des gesamten Kabels zu gewährleisten, kann der Bereich der Verbindung benachbarter Teilstücke 36 und 37 unter Einschluß des Bereichs der Dehnungsausgleichsvorrichtung 45 mit einer mechanisch stabilen, rohrförmigen Verbindungseinrichtung 46 überbrückt werden. Diese Einrichtung ist dabei starr an den Außenrohren 23a und 23b der benachbarten Teilstücke 36 und 37 befestigt. Die Verbindungseinrichtung 46 dient dabei zugleich zum mechanischen Schutz.

In Fig. 6 ist eine weitere Ausbildungsmöglichkeit einer Verbindung zwischen zwei vorgefertigten Teilstücken 48 und 49 eines erfindungsgemäßen Kabels in Fig. 5 entsprechender Darstellung angedeutet. Diese Ausführungsform unterscheidet sich von der Ausführungsform nach Fig. 5 im wesentlichen nur dadurch, daß auf ein besonderes Dichtungselement in dem zwischen den beiden stirnseitigen Enden der Teilstücke ausgebildeten Spalt 42 verzichtet ist. Dies wird unter anderem dadurch ermöglicht, daß hier die Vorrichtung 45 zum Dehnungsausgleich zwischen dem Außenrohr 23a und dem Innenrohr 22a in das Innenrohr integriert ist. Da so ein Zusammenziehen der Außenrohre beim Abkühlen des Kabels vermieden wird, läßt sich der Spalt 42 nach außen hin mittels der rohrförmigen Hülse 44 abdichten, die vakuumdicht mit den benachbarten Außenrohren 23a und 23b verbunden ist. Beispielsweise kann die Hülse 44 mit den Rohren verklebt sein. Bei dieser Ausführungsform der Teilstücke 48 und 49 des supraleitenden Kabels kann gegebenenfalls sogar auf eine zusätzliche starre Einrichtung zum gegenseitigen Verbinden der einzelnen Teilstücke verzichtet werden.

## Patentansprüche

1. Supraleitendes Kabel mit einem starren Innenrohr,  
 – in dem mindestens eine supraleitende Leiterader mit einem oxidkeramischen Hochtemperatursupraleiter-Material angeordnet ist, das von einem entsprechenden Kühlmedium gekühlt ist, und  
 – das von einem starren Außenrohr konzentrisch umschlossen ist, wobei zwischen dem Innen- und dem Außenrohr ein evakuierter Zwischenraum ausgebildet ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die mindestens eine Leiterader (7, 7a bis 7c) einen Stützkörper (8) aufweist, um den schraubenförmig ein bandförmiger Leiter (12) mit einem Hochtemperatursupraleiter-Material (Schicht 12b) gewickelt ist, wobei dieses Material zu seiner Stabilisierung zumindest stellenweise mit elektrisch gut-leitendem Material kontaktiert ist, und daß zumindest das das Kühlmedium führende Innenrohr (22, 22a, 22b) aus einem vakuum- und kühlmitteldichten Kunststoffmaterial besteht.
2. Kabel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der bandförmige Leiter (12) ein Trägerband (12a) aus dem elektrisch gut-leitenden Material enthält, das mit einer dünnen Zwischenschicht (12c) versehen ist, auf der eine Schicht (12b) aus dem Hochtemperatursupraleiter-Material haftet, und daß mit diesem bandförmigen Leiter (12) der Stützkörper (8) mehrlagig bewickelt ist.
3. Kabel nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Zwischenschicht (12c) ein die Bildung des Hochtemperatursupraleiter-Materials förderndes Material vorgesehen ist.
4. Kabel nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein Hochtemperatursupraleiter-Material auf Basis des Stoffsystems Y-Ba-Cu-O oder auf Basis des Stoffsystems Bi-Sr-Ca-Cu-O vorgesehen ist.
5. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der bandförmige Leiter (12) im Querschnitt gesehen stufenförmig ausgebildet ist.
6. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß in den Wickel (10) um den Stützkörper (8) zusätzlich zu dem bandförmigen Leiter (12) mindestens ein Leiterband (14) aus dem elektrisch gut-leitenden Material mit eingewickelt ist.
7. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Stützkörper (8) transparent für das Kühlmedium ausgebildet ist.
8. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Stützkörper (8) aus elektrisch gut-leitendem Material besteht.
9. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Stützkörper (8) als Seil ausgebildet ist.
10. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Leiterader (7, 7a bis 7c) eine Isolation (17) um den Wickel (10) aus dem bandförmigen Leiter (12) enthält, die für das Kühlmedium transparent ist.
11. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Außenrohr (23, 23a, 23b) aus einem vakuumdichten Kunststoffmaterial

besteht.

12. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Kunststoffmaterial ein Epoxidharz oder ein Thermoplast ist, das mit Fasern mechanisch verstärkt ist.
13. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß sein Rohrsystem (35) aus mehreren vorgefertigten Teilstücken (36, 37; 48, 49) zusammensetzbar ist.
14. Kabel nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilstücke (36, 37; 48, 49) in sich geschlossene, evakuierbare Zwischenräume (25) zwischen dem jeweiligen Innen- und Außenrohr (22a, 22b bzw. 23a, 23b) aufweisen.
15. Kabel nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, daß benachbarte Teilstücke (36, 37; 48, 49) an ihren einander zugewandten Stirnseiten (38, 39) ineinandergreifend gestaltet sind, wobei zwischen ihnen ein Spalt (42) ausgebildet ist, der mit mindestens einem Dichtungselement (43; Hülse 44) verschlossen ist.
16. Kabel nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Innenrohr (22; 22a, 22b) und/oder das Außenrohr (23; 23a, 23b) Vorrichtungen (45) zum Dehnungsausgleich enthält (enthalten).

- Leerseite -

3811051

Nummer:  
Int. Cl.4:  
Anmeldetag:  
Offenlegungstag:

38 11 051  
H 01 B 12/02  
31. März 1988  
12. Oktober 1989

1/4

16

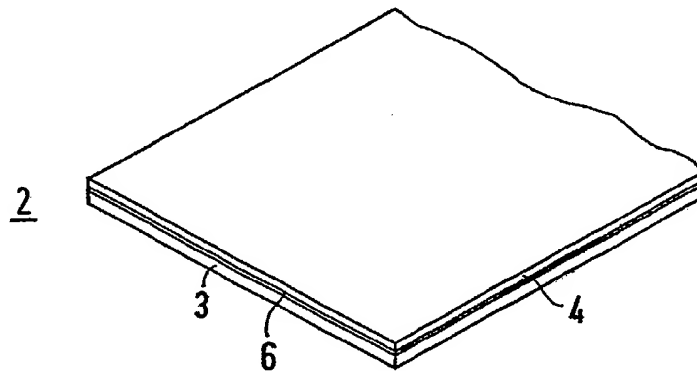


FIG 1

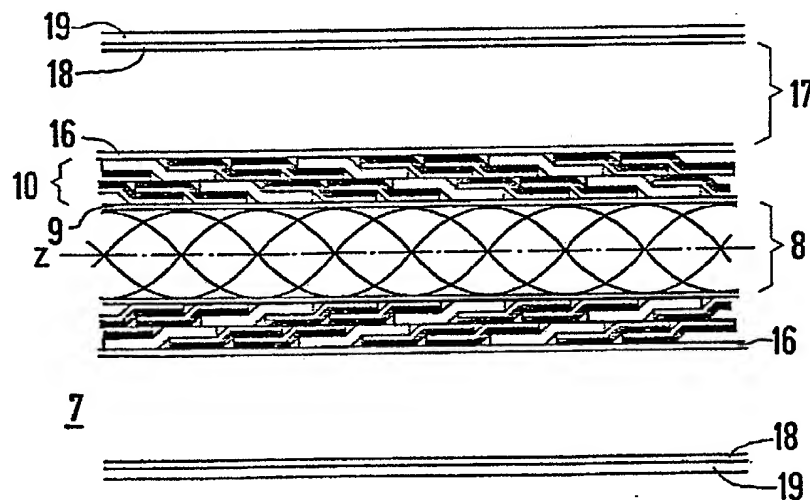


FIG 2

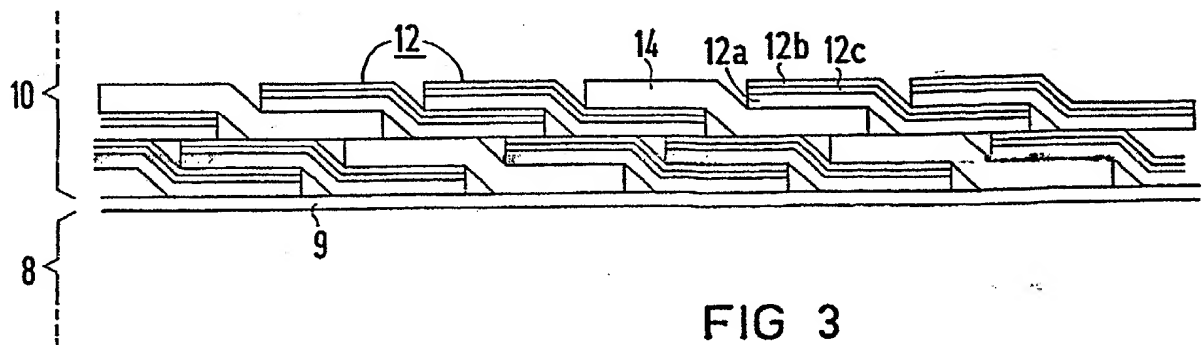


FIG 3

3100 80

88 P 3 1 2 8 DE

2/4

17

3811051

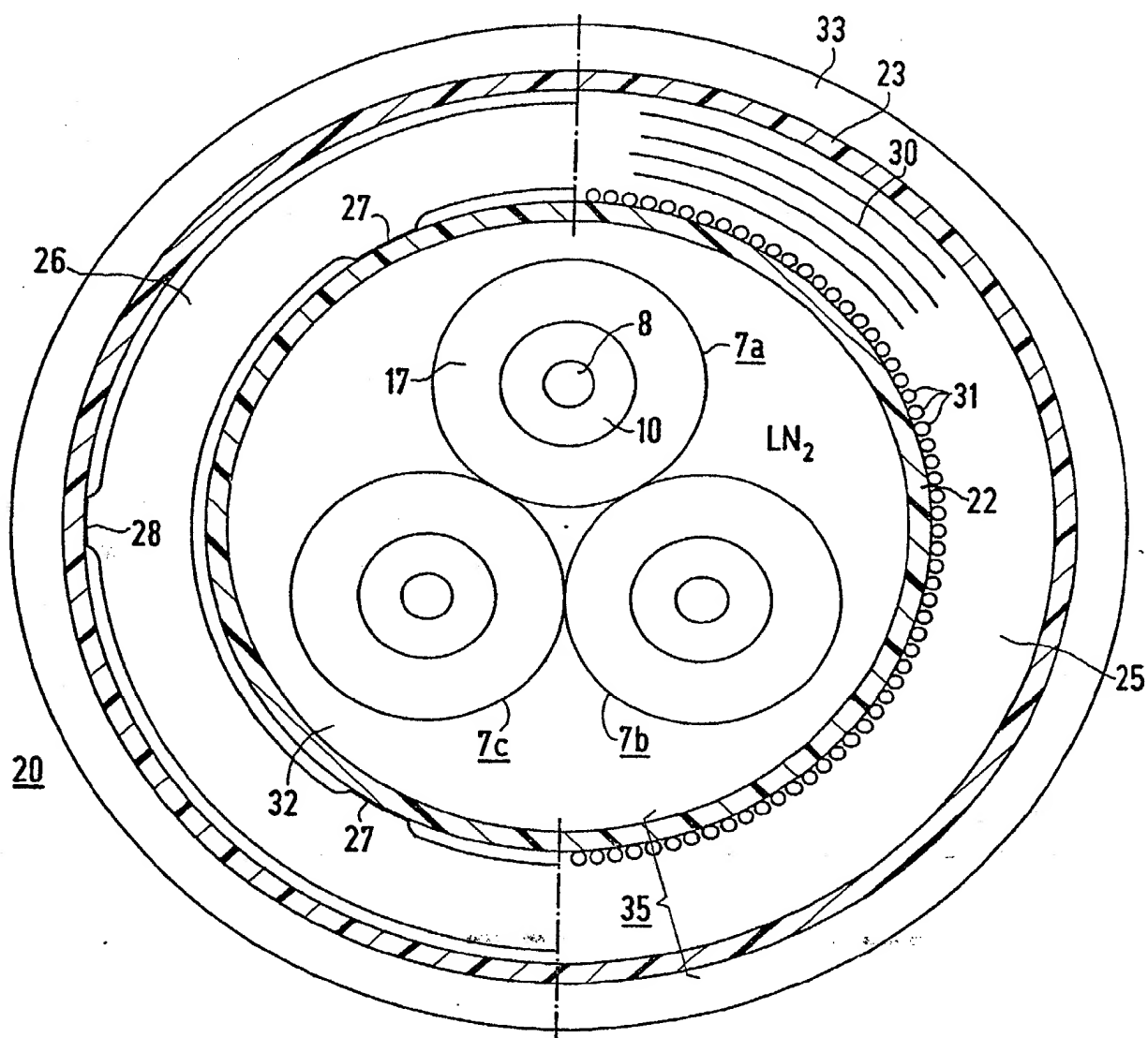


FIG 4



3/4

3811051

18

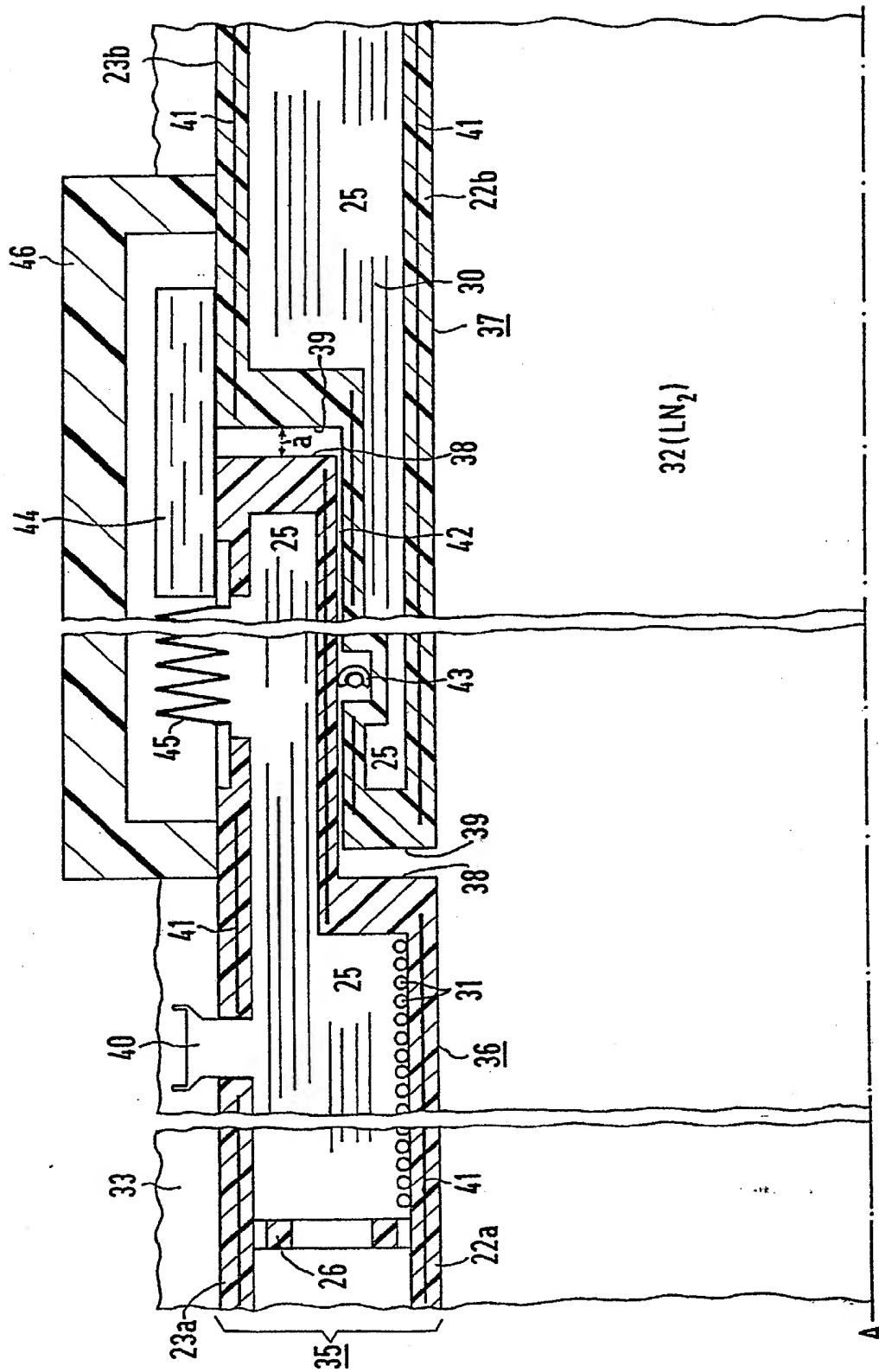


FIG 5

4/4

19 \*

3811051

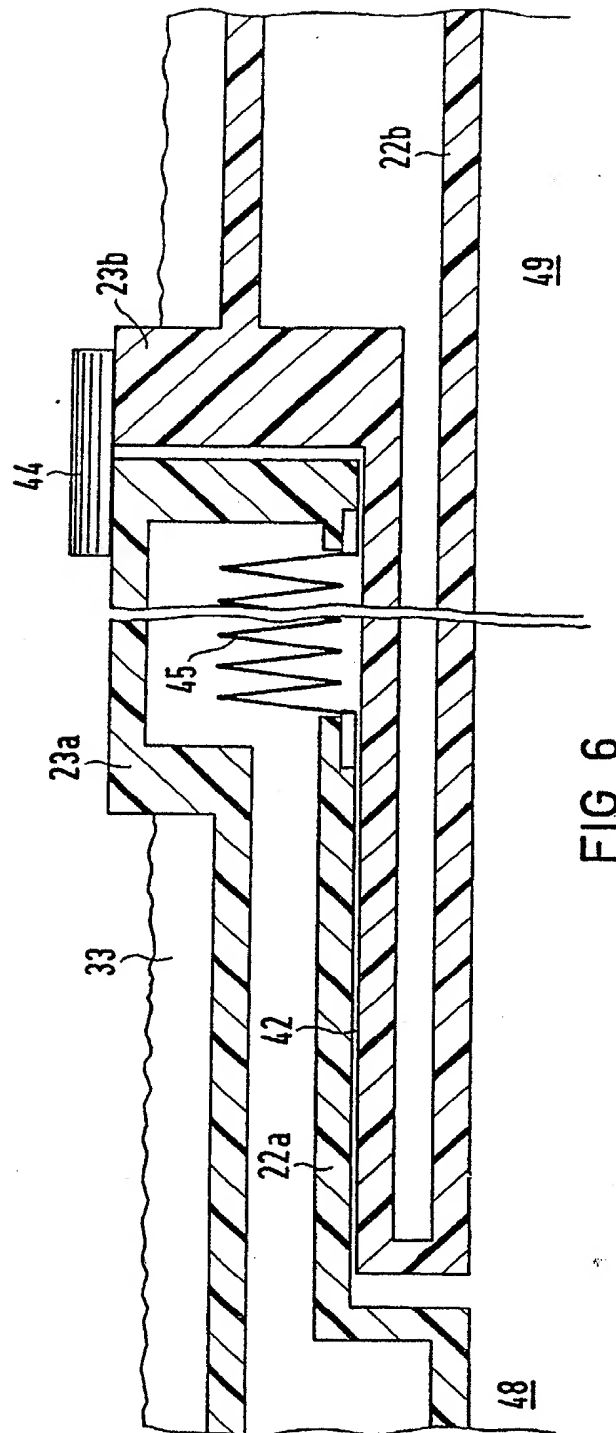


FIG 6

### Description

The invention relates to a superconducting cable with a rigid inner tube in which at least one superconducting core with an oxide-ceramic high-temperature superconducting material is disposed, cooled by an appropriate coolant, and which is concentrically enclosed by a rigid outer tube, an evacuated intermediate space being formed between the inner and the outer tube. A cable of this type is mentioned in the publication by A.P. Malozemoff et al: "Applications of High Temperature superconductivity", IBM T.J. Watson Research Center and Massachusetts Institute of Technology, August 1987.

The cables used to carry three-phase current, particularly at the standard voltage of 100 V, must have a very high power rating of 1 GVA at high currents of 5kA, for example, and enable cost-effective power transmission whilst requiring a low amount of space. Accordingly, until now, high outputs have been transmitted with artificially cooled oil-filled cables or with SF<sub>6</sub>-cables.

Although superconducting high-power cables with liquid helium cooling and high vacuum isolation have been developed (see contribution by G. Bogner in "Nato Advanced Study Institutes Series", Series B: Physics, Vol. 21: "Superconductor Applications", Plenum Press, New York 1977, Chapter 20, Section V: "Superconducting Cables", pages 672-677), they have not been used for economic reasons. However, cables of this type have a rigid inner tube in which at least one superconducting core conductor is disposed. This core conductor has to be kept cool at all times by liquid helium (LHe) flowing through this inner tube. As a result, the inner tube is commonly referred to as a helium(He)-tube. This tube is enclosed in a vacuum-resistant outer tube which is generally made from steel. The intermediate space between the inner and the outer tube is evacuated to provide heat insulation. In addition, in order to reduce the amount of heat transmitted to the He-cooled inner tube, a cooled thermal radiation shield is usually disposed in the evacuated intermediate space.

The He-tube in a superconducting cable of this type must also be made of metal, in particular steel, because the extremely small helium atoms would easily penetrate any other material, which could impair the high vacuum isolation. However, metallic coolant tubes induce eddy currents, which generate considerable heat. The accompanying additional losses must be removed from the coolant at a degree of efficiency which is very poor due to the cooling equipment used. Coaxial, shielded core conductors have always been used in known

superconducting three-phase cables in order to get round this problem. However, a coaxial structure of this type requires at least twice the amount of superconducting material needed for a single conductor structure. Furthermore, such cables require an appropriately adapted protective circuit of a non-standard type.

Since about the start of 1987, superconducting materials have been known which have a critical temperature  $T_c$  that is so high that they can no longer be cooled with liquid helium (LHe), being approximately 4 K, but which can be sufficiently cooled with liquid nitrogen ( $\text{LN}_2$ ). These materials are special metal oxides, for example with a base of the substance system Y-Ba-Cu-O (see, for example "Europhysics Letters", Vol. 4, No. 2, 15.7.87, pages 247 to 252 and Vol. 4 No. 5 1.9.87 page 637 or "Physikalische Blätter", Volume 43, No. 9 1987, pages 357 to 363). Films or thin films of these metal oxide compounds are commonly produced using special vapour deposition or sputtering techniques. To this end, a polycrystalline or amorphous initial product with the components of the selected substance system is firstly deposited on an appropriate substrate, during which process the oxygen content is not set exactly. This initial product is then overlaid with the desired superconducting phase by a heat and oxygen treatment in the material. In addition to the substance system Y-Ba-Cu-O mentioned above, other substance systems have also become known which have such high critical temperatures that they have to be kept at their superconducting operating temperature with  $\text{LN}_2$ . For example, materials based on the substance system Bi-Sr-Ca-CuO (see "Superconducting News Supplement", Vol. 1, No. 3, February 1988) or based on the substance system Tl-Sr-Ca-Cu-O (see for example "International Conference on High  $T_c$  Superconductors and Materials and Mechanisms of Superconductivity", 29.2 - 4.3.1988, Interlaken, CH) or based on the substance system La-Sr-Nb-O (see for example "The Japan Times" dated 21.1.1988 or "Journal of Low Temperature Physics", Vol. 69, Nos. 5/6, 1987, pages 451 to 457).

All of these superconducting materials are classed as oxide ceramics and the high- $T_c$ -superconductors made from them are commonly referred to as oxide-ceramic superconductors.

In the contribution by A.P. Malozemoff et al mentioned above, it is suggested that oxide-ceramic superconductors of this type could be used in superconducting cables ("Superconducting Power Transmission Lines-SPTL"). This suggestion is based on known designs of superconducting cables with superconductors cooled by LHe. However, these designs have the problems relating to eddy currents, use of extra superconducting material and protective circuits described above.

The underlying objective of the invention is to propose a superconducting cable based on this cable design, containing at least one superconducting core conductor which can be made from a known oxide-ceramic high-temperature superconductor material. This cable should be of the simplest possible structure and such that it allows the use of a cooling method suitable for the high-temperature superconductor (HSC) material but in particular eliminates, at least to a large degree, the additional thermal dissipation caused by eddy currents in the metallic tube components used in known cables.

This objective is achieved by the invention due to the fact that the at least one core conductor has a support body, about which a ribbon-shaped conductor with the high-temperature superconducting material is wound in a screw arrangement, this material being placed in contact, at least in certain regions, with good electrically conductive material in order to stabilise it and at least the inner tube carrying the coolant is made from a vacuum-resistant and coolant impermeable plastics material.

The specific advantages inherent in the superconducting cable of this design reside in the fact that a core conductor with the ribbon-shaped HTS material is relatively easy to make. The requisite stabilisation of the HTS material can be achieved by placing it in contact with the good electrically conductive material. This may be achieved, for example, by providing the stabilising material on the actual ribbon-shaped conductor. Alternatively, the HTS material of the ribbon-shaped conductor may also be placed against the stabilising material of an adjacent conductor. The adjacent conductor may also be a conductor consisting of the stabilising material only.

By using an inner tube made from an electrically non-conducting material, the problems caused by eddy currents induced by metallic parts are advantageously ruled out from the outset. Plastics materials are generally known which are suitable in terms of being impermeable to  $\text{LN}_2$  coolant.

Advantageous embodiments of the superconducting cable can be found in the dependent claims.

The invention will be explained in more detail with reference to the diagrams of the appended drawings. **Fig. 1** illustrates the main structure of a cable as proposed by the invention which may be used as the ribbon-shaped high-temperature superconductor. **Fig. 2** shows a longitudinal section through a core conductor of the cable whilst **Fig. 3** depicts a segment of this core conductor for the high-temperature superconductor. **Fig. 4** is a view in cross section through a superconducting cable. **Figs. 5 and 6** respectively illustrate a longitudinal section showing

options for connecting part-pieces of the tube system of this cable. The same components in the different drawings are denoted by the same reference numbers.

**Fig. 1** shows a view of the main structure of an end piece of a ribbon-shaped superconductor **2** seen from an angle, of the type used for the superconducting cable proposed by the invention. This conductor contains a metallic base strip **3**. The base strip may be made from a good electrically conductive material, for example Cu or Al, and serves as a base for a thin film **4** made from known superconducting material with a high enough critical temperature  $T_c$  to allow liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) to be used as a coolant. A suitable high-temperature superconducting (HTS) material would be YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (with  $0 < x < 0.5$ ) with an orthorhombic crystal structure, for example. To ensure that the HTS material can be applied so that it effectively adheres to the base strip **3** as a film **4**, it is generally necessary to apply a thin intermediate layer **6**, which is preferably made from a specific ceramic material. For example, the intermediate layer **6** may consist of MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y-stabilised ZrO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> or SrTiO<sub>3</sub>.

A core conductor of the cable as proposed by the invention can now be produced using ribbon-shaped superconductors of this structure. A corresponding embodiment of such a core conductor is schematically illustrated in longitudinal section in **Fig. 2** as an example. This core conductor is shown on an enlarged scale in **Fig. 3** as a segment depicting a wound arrangement of the HTS ribbon conductor.

The core conductor **7** illustrated in **Fig. 2** contains a central support body **8**, which is advantageously made from a good electrically conductive material such as Al or Cu and is sufficiently transparent to the coolant LN<sub>2</sub>. In the embodiment illustrated as an example here, the support body **8** is of a rope design, the central axis of which is denoted by  $z$ . Several HTS ribbon conductors are now wound in several layers in a screw pattern around this support body **8**, which is optionally rendered smooth by a metal film **9**. For the sake of clarity, only a few layers are shown in the drawing, although a larger number would generally be provided. The structure of the winding **10** is more clearly illustrated in **Fig. 3**. As may be seen from this drawing, the ribbon-shaped superconductors **12** having the structure illustrated in **Fig. 1** are disposed in a stepped structure, so that they lie in two planes in the winding **10**, adjacent ribbon conductors respectively overlapping with one another by about a half. Within the winding, the metal of the base strip **12a** of the conductor wound over the top is in electrical contact with the HTS layer **12b** of the conductor lying underneath. Consequently, this ensures that the HTS material of the layers **12b** is effectively stabilised, i.e. in the situation referred to as "quench" when the

superconducting material switches into the poor electrically conductive normal conducting state, the current is able to spread into the conductor lying above. Since the intermediate layer 12c, consisting of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  or  $\text{SrTiO}_3$  for example, between the base strip 12a and the HTS layer 12b of each conductor 12 is itself an electrical insulator, it is practically impossible for current to be effectively transmitted directly from the HTS material into the metallic base material within a conductor 12.

As may also be seen from Fig. 3, in addition to the HTS ribbon conductors 12, conductor ribbons 14 made from good electrically conductive metals may be incorporated in the winding, which promote the transfer of current between the different layers within the winding. Conductor ribbons 12a of this type are necessary in particular if the materials selected for the HTS ribbon conductors 12 do not sufficiently stabilise the superconducting materials within the winding 10.

As illustrated in Fig. 2, the exterior winding 10 may be rendered smooth by a metal film 16 before it is encased in an electric insulation 17. This insulation may be in the form of a winding, such as commonly used with paper-insulated cables. It is advantageously impregnated with the coolant medium  $\text{LN}_2$  used for cooling the HTS material and is therefore duly rendered transparent. This coolant in effect has outstanding insulating properties provided the formation of vapour bubbles is avoided.

A shield 18 is placed over the insulation 17 fulfilling the functions of controlling potential and limiting the electric field, conveying leakage and charge currents and affording protection against electrical contact. Above it is a sheath 9 which mechanically assists the sliding action when the core conductor 7 is pulled into a cooling tube. Since this cooling tube may be made from electrically non-conducting materials for the purpose of the superconducting cable proposed by the invention, the core conductor 7 advantageously does not have a second, concentric return conductor such as has been necessary in known superconducting cables until now.

Core conductors of the structure illustrated in Figs. 2 and 3 may advantageously be used for the superconducting cable proposed by the invention. Such a cable is schematically illustrated in cross section in Fig. 4. This cable, shown by reference 20, may be designed as a three-phase cable in particular, in which case it will contain three core conductors 7a to 7c. In order to accommodate these core conductors, the cable has an inner tube 22, which is advantageously made from a vacuum-resistant and coolant impermeable plastics material. The inner tube is concentrically encased by an outer tube 23, forming an intermediate space 25 of an annular shape

as seen in cross section. The same material as that used for the inner tube may be used for the outer tube. In particular, the two tubes 22 and 23 may be made from fibre-reinforced plastics. For example, epoxy resins or thermoplastic materials are particularly well suited to this purpose, in particular reinforced with glass, kevlar or carbon fibres. The two tubes 22 and 23 are retained in their concentric position by support structures made from poor heat-conducting materials. Half of one of these supporting rings 26 is shown in the drawing. This supporting ring is designed to provide relatively long distances between its support points 27 and 28 on the inner tube 22 and the outer tube 23. A known multi-layered super-insulation 30, partially illustrated in one half of the cable shown in the drawing, may also be provided in the intermediate space 25, which is evacuated for thermal reasons, to limit the amount of heat transmitted to the inner tube 22 still further. Moreover, an adsorption means 31, e.g. activated carbon or a zeolite, may be disposed on the vacuum side of the inner tube 22. The residual molecules in the vacuum chamber bond with this adsorption means in the cold state.

A coolant, preferably liquid nitrogen  $\text{LN}_2$ , flows over the core conductors 7a to 7c in the interior 32 of the inner tube 22. The inner tube 22 is therefore often also referred to as the coolant tube. The coolant is in an under-cooled liquid state, for example; i.e. during normal operation, the coolant will not boil.  $\text{LN}_2$  is fed into the inner tube 22 at a temperature of approximately 70 K and an absolute pressure of approximately 5 bar, for example. As it flows through this tube, the coolant is heated and the pressure reduced. The coolant is still under-cooled as the end of the tube, at a temperature of approximately 80 K and an absolute pressure of approximately 3 bar, for example.

Finally, as may be seen from Fig. 4, the outer tube 23 of the superconducting cable 20 may be sheathed by a protective coating 33, which may be bitumen for example. This avoids any mechanical damage to the cable and prevents the ingress of water.

The tube system of the superconducting cable 20 which thermally insulates the superconducting core conductors 7a to 7c and the  $\text{LN}_2$  surrounding them is denoted by reference 35 as a whole in Fig. 4. This tube system is advantageously assembled with the outer and inner tube by means of pre-fabricated part-pieces. A connecting region between two adjacent part-pieces of this type is illustrated in Fig. 5. In this drawing, only the top halves of part-pieces 36 and 37 are schematically illustrated as a longitudinal section relative to the cable axis A. As may be seen from this drawing, each of the part-pieces 36 and 37 is designed so that the evacuated



space 25 between the inner tube 22a or 22b and the outer tube 23a or 23b fit in a vacuum-tight seal at the two end faces 38 and 39 of each part-piece. The space 25 between the part-pieces is evacuated from an evacuation connector 40 at the manufacturing stage before being closed off in a vacuum-tight seal. In order to improve the vacuum seal of the individual plastics components still further, thin metallized films 41 acting as dispersion barriers may optionally be incorporated in the outer and inner tube 23a, 23b or 22a, 22b and in the connecting parts of these tubes at end faces 38 and 39.

The end faces 38 and 39 of the adjacent part-pieces 36 and 37 which face one another are designed so that one end of each part-piece projects concentrically into the other end of the other part-piece. As a result, any heat which wants to flow from the hot outer tube to the cold inner tube can flow via the tube parts inserted concentrically one in the other so that it will have to flow via a relatively long path. This limits the amount of heat introduced into the LN<sub>2</sub> region in the interior 32 of the tubes 22a, 22b. Between the parts of the part-pieces 36 and 37 projecting one inside the other is a slight gap 42. In an axially extending part of this gap 42 is a seal 43 which separates the interior 32 filled with LN<sub>2</sub> from the ambient environment. In addition, the gap 42 may be covered on the exterior by a tubular sheath 44 which is joined, for example bonded, to one of the two adjacent outer tubes 23a or 23b. Alternatively, the sheath 44 may also be an integrated element of this outer tube.

Each of the part-pieces 36 and 37 also has a device 45 to compensate for expansion, which compensates for variations in the length of the inner tube 22a, 22b during cooling. In the embodiment of the part-piece 36 illustrated in Fig. 5, this device 45 is integrated in the outer tube 23a thereof, in the vicinity of the end face 38. Consequently, as the cable cools, the outer tube 23a shortens in an axial direction by the shrinkage mass of the inner tube 22a. The axial distance *a* between the end faces 38 and 39 of the adjacent part-pieces 36 and 37 is therefore widened accordingly. In order to ensure that the length of the entire cable remains constant as far as possible, the connecting region between adjacent part-pieces 36 and 37 may be bridged by a mechanically stable, tubular connector 46 enclosing the expansion compensating device 45. This arrangement is rigidly secured to the outer tubes 23a and 23b of the adjacent part-pieces 36 and 37. The connecting region 46 therefore simultaneously affords mechanical protection.

Fig. 6 illustrates another possible embodiment of a connection between two pre-fabricated part-pieces 48 and 49 of a cable proposed by the invention of the type illustrated in Fig. 5. This embodiment essentially differs from that illustrated in Fig. 5 only due to the fact that

a separate seal in the gap 42 between the two front ends of the part-pieces is dispensed with. This is made possible amongst other things because the device 45 used to compensate for expansion between the outer tube 23a and the inner tube 22a in this case is integrated in the inner tube. Since this prevents shrinkage of the outer tubes as the cable cools, the gap 42 can be sealed at the exterior by means of the tubular sheath 44, which is joined to the adjacent outer tubes 23a in a vacuum tight fit. The sheath 44 may be bonded to the tubes, for example. In this embodiment of the part-pieces 48 and 49 of the superconducting cable, it is even possible, optionally, to dispense with an additional rigid device to join the individual part-pieces reciprocally to one another.

### Claims

1. Superconducting cable with a rigid inner tube,

- in which at least one superconducting core conductor with an oxide-ceramic high-temperature superconducting material is disposed, cooled by an appropriate coolant, and
- which is concentrically enclosed by a rigid outer tube, an evacuated intermediate space being formed between the inner and the outer tube, **characterised in that** the at least one core conductor (7, 7a to 7c) has a supporting body (8) about which a ribbon-shaped conductor (12) with a high-temperature superconducting material (layer 12b) is wound, this material being in contact, at least in certain regions, with a good electrically conductive material in order to stabilise it and at least the inner tube (22, 22a, 22b) conveying the coolant is made from a vacuum-resistant and coolant impermeable plastics material.

2. Cable as claimed in claim 1, characterised in that the ribbon-shaped conductor (12) contains a base strip (12a) made from the good electrically conductive material, which is provided with a thin intermediate layer (12c) on which a layer (12b) of the high-temperature superconducting material is adhered and the supporting body (8) is wound with multiple layers of this ribbon-shaped conductor (12).

3. Cable as claimed in claim 2, characterised in that a material which promotes the formation of the high-temperature superconducting material is used for the intermediate layer (12c).

4. Cable as claimed in claim 2 or 3, characterised in that the high-temperature superconducting material used is based on the substance system Y-Ba-Cu-O or is based on the substance system Bi-Sr-Ca-Cu-O.
5. Cable as claimed in one of claims 1 to 4, characterised in that the ribbon-shaped conductor (12) is of a stepped design viewed in cross section.
6. Cable as claimed in one of claims 1 to 5, characterised in that in addition to the ribbon-shaped conductor (12), at least one conductor ribbon (14) made from a good electrically conductive material is also wound around the supporting body (8) in the winding (10).
7. Cable as claimed in one of claims 1 to 6, characterised in that the supporting body (8) is transparent to the coolant.
8. Cable as claimed in one of claims 1 to 7, characterised in that the supporting body (8) is made from a good electrically conductive material.
9. Cable as claimed in one of claims 1 to 8, characterised in that the supporting body (8) is of a rope design.
10. Cable as claimed in one of claims 1 to 9, characterised in that the core conductors (7, 7a to 7c) contain an insulation (17) about the winding (10) of the ribbon-shaped conductor (12) which is transparent to the coolant.
11. Cable as claimed in one of claims 1 to 10, characterised in that the outer tube (23, 23a, 23b) is made from a vacuum-resistant plastics material.
12. Cable as claimed in one of claims 1 to 11, characterised in that the plastics material is an epoxy resin or a thermoplastic material mechanically reinforced with fibres.
13. Cable as claimed in one of claims 1 to 12, characterised in that its tube system (35) can be assembled from several pre-fabricated part-pieces (36, 37; 48, 49).

14. Cable as claimed in claim 13, characterised in that the part pieces (36, 37; 48, 49) have closed intermediate spaces (25) between the respective inner and outer tube (22a, 22b or 23a, 23b) which can be evacuated.

15. Cable as claimed in claim 13 or 14, characterised in that adjacent part-pieces (36, 37, 48, 49) are designed so as to be inserted one inside the other by their oppositely facing end faces (38, 39), a gap (42) being formed between them, which is closed off by at least one seal (43; sheath 44).

16. Cable as claimed in one of claims 1 to 15, characterised in that the inner tube (22; 22a, 22b) and/or the outer tube (23; 23a, 23b) contain (contains) devices (45) to compensate for expansion.